Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 313–314.

УДК 535.35
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-313
ORCID: 0009-0003-5321-0810

ОЦЕНКА ИНТЕНСИВНОСТИ ЛИДАРНОГО СИГНАЛА ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ АТОМОВ МЕЗОСФЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ

С.М. Бобровников, Е.В. Горлов, В.И. Жарков, С.Н. Мурашко

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия, msn_17@mail.ru

ESTIMATION OF LIDAR SIGNAL INTENSITY DURING FLUORESCENCE EXCITATION OF MESOSPHERIC METAL ATOMS

S.M. Bobrovnikov, E.V. Gorlov, V.I. Zharkov, S.N. Murashko

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia, msn_17@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты расчета лидарного сигнала флуоресценции атомов мезосферных металлов в зависимости от высоты над уровнем моря с учетом молекулярного и аэрозольного рассеяний. Проведено сравнение интенсивностей сигналов флуоресценции четырех металлов. Определено, что максимальное отношение сигнал/шум достигается при инициировании излучательных переходов калия K.

Ключевые слова: флуоресценция, лидар, мезосфера, металлы.

Abstract. This report presents the results of calculating the lidar fluorescence signal of mesospheric metal atoms as a function of altitude above sea level, taking molecular and aerosol scattering into account. The intensities of fluorescence signals of four metals were compared. We have revealed that the maximum signal-to-noise ratio is achieved when radiative transitions of potassium K are initiated.

Keywords: fluorescence, lidar, mesosphere, metals.

Основным источником металлических частиц и их паров в мезосфере является метеорная абляция. Различие в физических и химических свойствах элементов, являющихся основными компонентами метеорного вещества, определяют особенности высотного расположения и структуры каждого из слоев атомарных паров. К таким химическим элементам относятся натрий Na, железо Fe, магний Mg, кальций Ca (Ca^+), калий K и кремний Si [Бобровников и др., 2025].

Задача мониторинга средних значений и динамики параметров мезосферных атомарных слоев имеет важное значение как с точки зрения фундаментальных вопросов исследования солнечно-земных связей и глобальных геофизических процессов [Торшков, 2020], так и при решении ряда прикладных задач. Использование космических орбитальных аппаратов позволяет частично решать задачу глобального мониторинга состояния мезосферных атомарных слоев. Однако эти методы имеют низкое пространственное и временное разрешение. Тогда как специализированные наземные лидары принципиально позволяют осуществлять мониторинг состояния атомарных мезосферных слоев с гораздо лучшим разрешением и высокой оперативностью. Для получения лидарных откликов в мезосферных лидарах используют эффект резонансной флуоресценции. В этом случае коэффициент обратного резонансного рассеяния (флуоресценции) пропорционален концентрации резонансно возбуждаемых атомов и сечению взаимодействия. Большие значения сечения резонансной флуоресценции для паров металлов обеспечивают высокую чувствительность метода и позволяют определять низкие концентрации атомарных компонентов, с которыми приходится сталкиваться при изучении мезосферных слоев. Именно поэтому лидарные технологии [Shibata et al., 2004; Gelbwachs, 1994; Kane, Gardner, 1993; Plane et al., 2015] являются наиболее востребованными при решении задач мониторинга параметров мезосферы.

Ранее в работе [Бобровников и др., 2025] были показаны результаты моделирования лидарного отклика паров мезосферного железа Fe. Расчеты были проведены в предположении молекулярной атмосферы. По предварительным оценкам, с учетом значений коэффициентов Эйнштейна для наиболее интенсивных спонтанных переходов, возможно добиться большего отношения сигнал/шум при возбуждении флуоресценции других металлов, чем при использовании железа. Кроме того, в расчетах не учитывается влияние атмосферного аэрозоля на ослабление излучения. Ослабление тропосферным аэрозолем можно учесть в виде добавочного коэффициента T, который определяет интегральную прозрачность тропосферы для модели атмосферной дымки [Межерис, 1987]. В таблице 1 представлены входные параметры, используемые для расчета лидарного сигнала флуоресценции мезосферных металлов с учетом молекулярного и аэрозольного рассеяний.

Результаты моделирования представлены на рисунке 1.

Видно, что интенсивность флуоресценции при возбуждении атомов Ca^+ и K выше, чем при возбуждении Fe. Наибольшее отношение сигнал/шум достигается при инициировании излучательных переходов K и составляет примерно 10^6.

Табл.1 – Входные параметры лидарного уравнения

Параметр	Значение			
	Ca	Ca^+	Fe	K
Максимальная концентрация атомов металла в слое, $см^{-3}$	17	128	2800	39
Высота, соответствующая максимальной концентрации, км	89,6	91	92,4	92,1
Пространственное разрешение, м	400			
Степень вырождения верхнего состояния	3	4	11	4
Степень вырождения нижнего состояния	1	2	9	2
Коэффициент Эйнштейна для спонтанного перехода, $с^{-1}$	$2{,}18\cdot10^8$	$1{,}47\cdot10^8$	$1{,}62\cdot10^7$	$3{,}78\cdot10^7$
Энергия лазерного импульса, мДж	28	57	52	113
Длина волны излучения в воздухе, нм	422,673	393,366	371,994	766,490
Диаметр приемной апертуры, м	2,2			
Коэффициент пропускания приемной оптической системы, %	70			
Коэффициент пропускания монохроматора, %	70			
Квантовая эффективность фотодетектора, %	32	30,3	30	10,4
Вертикальное распределение концентрации паров металлов	*)			
Вертикальное распределение концентрации молекулярной атмосферы	**)			
Пропускание атмосферы	***)			

*) В качестве модельного распределения концентрации атомов металлов в мезосфере использовалось нормальное распределение Гаусса.

**) Вертикальное распределение концентрации молекулярной атмосферы вычислялось при использовании данных стандартной атмосферы для средних широт [ГОСТ 4401–81, 2004].

***) При вычислении прозрачности использовалась модель, представленная в [https://www.spectral.com/modtran].

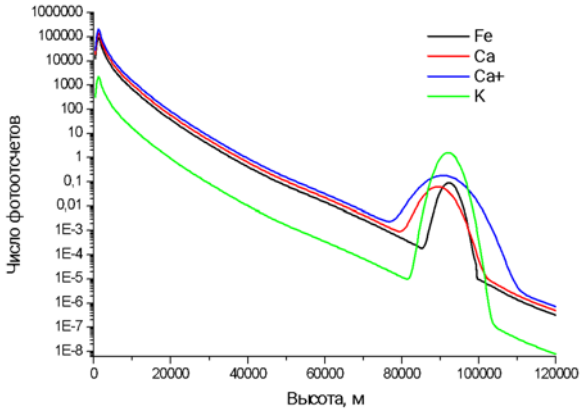

Рис.1. Сравнение лидарных откликов для четырех основных атомарных компонентов мезосферы для благоприятных условий зондирования

Исследование выполнено в рамках Государственного задания ИОА СО РАН, проект «Лазерные, оптические и акустические технологии дистанционного изучения атмосферы».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бобровников С. М., Больбасова Л. А., Горлов Е. В. и др. Сравнительный анализ эффективности схем возбуждения резонансной и каскадной флуоресценции атомов мезосферы для создания лазерных опорных звезд. Часть I. Атомы калия и никеля. // Оптика атмосферы и океана. 2025. Т. 38. № 02. С. 152–156.

Бобровников С.М., Горлов Е.В., Жарков В.И. и др. Оценка интенсивности лидарного сигнала при возбуждении флуоресценции атомов железа в мезосфере // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Матлы Междунар. симп. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Томск, 08–11 июля 2025 г. Томск, 2025. С. B215-B218.

Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.

Торшков А. В., Аксенов С. Н., Курьянова М. В. и др. Многолетние лидарные наблюдения мезосферного слоя натрия в Восточной Сибири: сезонная и межгодовая изменчивость // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 4. С. 274–281.

Gelbwachs J. A., Iron Boltzmann factor LIDAR: proposed new remote-sensing technique for mesospheric temperature, Appl. Opt. 1994. V. 33. P. 7151-7156.

Kane T. J., Gardner C.S. Lidar observations of the meteoric deposition of mesospheric metals // Science. 1993. V. 259, № 5099. P. 1297-1300.\

Plane J. M. C., Feng W., Dawkins E. C. M. The Mesosphere and Metals: Chemistry and Changes // Chem. Rev. 2015. V. 115, № 10. P. 4497–4541.

Shibata Y., Nagasawa C., Abo M. Measurement of the Mesospheric Iron Temperature and Potassium Layer by High Power Resonance LIDAR // Applied Optics. 2004. V. 2. P. 1–4.

ГОСТ 4401–81. Атмосфера стандартная. Параметры [Текст]: утв. Госстандартом СССР 27.02.1981 : введ. 01.07.1982. – Взамен ГОСТ 4401–73. – Изд. офиц. с Изм. № 1. – М.: Издательство стандартов, 2004. – 35 с. – (Межгосударственный стандарт). – Соответствует междунар. стандарту ИСО 2533–75.

URL: https://www.spectral.com/modtran (дата обращения 10.02.2026).